

CURVAS DE FRAGILIDAD PARA ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO Y COMPARACIÓN CON HAZUS¹

Roberto Aguiar² y Carlos Bobadilla³

Resumen: Mediante el análisis no lineal de 692 casos de estructuras de hormigón armado constituidas por vigas y columnas, de uno a seis pisos y sometidas a nueve registros sísmicos medidos en Colombia y con aceleración máxima del suelo mayor a 0.1 g, se presentan curvas de fragilidad de desplazamiento lateral máximo. Las curvas se comparan con las reportadas por el programa HAZUS y curvas de fragilidad de la deriva máxima de piso. La geometría, armado (o refuerzos) y los materiales de las estructuras responden a la forma como se construye en el Ecuador. Se presentan curvas de fragilidad para cuatro niveles de daño sísmico denominados: leve, moderado, extenso y completo.

Palabras Claves: curvas de fragilidad, estimación de pérdidas, HAZUS, vulnerabilidad sísmica.

FRAGILITY CURVES FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AND COMPARISON TO HAZUS

Abstract: Using non-linear analysis of 692 reinforced concrete structures with beams and columns, from one to six stories and subjected to nine seismic records registered in Colombia with maximum ground acceleration higher than 0.1g, maximum lateral displacement fragility curves are presented. These curves are compared with those reported by the program HAZUS and with maximum story drift fragility curves. The structure's geometry, reinforcement and material respond to the construction standards in Ecuador. Fragility curves for four level of damage called: slight, moderate, extensive and complete are also presented.

Keywords: fragility curves, HAZUS, loss estimation, seismic vulnerability.

INTRODUCCIÓN

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias, FEMA por sus siglas en Inglés, publicó en 1999 el programa HAZUS que proviene de Hazards U.S. en el cual se presenta una metodología para la estimación de las pérdidas por sismos. Más que eso, HAZUS presenta información muy práctica que puede ser utilizada en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una ciudad en forma bastante rápida.

Entre la información provista por HAZUS se tienen las curvas de fragilidad, tema que se aborda en éste artículo. En efecto, HAZUS 99 presenta estas curvas para cuatro niveles de diseño denominados: pre-norma, bajo, moderado y alto. Para cada uno de estos niveles de diseño se tiene un límite de la deriva máxima de piso γ , los que se indican en las Tablas 1 y 2 para cuatro niveles de daño denominados: leve, moderado, extenso y completo.

Tabla 1: Valores de γ en el umbral del nivel de daño para estructuras C1L.

Niveles de daño	Niveles de diseño			
	Pre-norma	Bajo	Moderado	Alto
Leve	0.0040	0.0050	0.0050	0.0050
Moderado	0.0064	0.0080	0.0087	0.0100
Extensivo	0.0160	0.0020	0.0233	0.0300
Completo	0.0400	0.0500	0.0600	0.0800

¹ Artículo recibido el 10 de enero de 2006 y en forma revisada el 3 de febrero de 2006.

² PhD, MSc, Ingeniero Civil, Catedrático de la Facultad de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador. E-mail: raguiar@espe.edu.ec.

³ Ingeniero Civil, Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador. E-mail: lioncarl007@hotmail.com.

Tabla 2: Valores de γ en el umbral del nivel de daño para estructuras C1M.

Niveles de daño	Niveles de diseño			
	Pre-norma	Bajo	Moderado	Alto
Leve	0.0027	0.0033	0.0033	0.0033
Moderado	0.0043	0.0053	0.0058	0.0067
Extensivo	0.0107	0.0133	0.0156	0.0200
Completo	0.0267	0.0333	0.0400	0.0533

Los valores de las derivas máximas de piso en el umbral del nivel de daño indicadas en las Tablas 1 y 2 corresponden a estructuras de hormigón armado, sin muros de corte, de 1 a 3 pisos y de 4 a 7 pisos que HAZUS 99 las denomina C1L y C1M, respectivamente. Se destaca que HAZUS 99 presenta valores similares para 36 tipologías estructurales. En Aguiar (2002) se presenta un estudio bastante detallado del programa HAZUS 99.

En este trabajo se han analizado 119 estructuras de hormigón armado de 1 a 6 pisos, que corresponden a los casos C1L y C1M, obteniendo las curvas de fragilidad. Estas curvas se comparan con las reportadas por HAZUS 99 con el propósito de ver si son aplicables a las construcciones de Ecuador y para establecer a qué nivel de diseño sísmico se aproximan más las construcciones de Ecuador.

Se obtuvieron curvas de fragilidad para los siguientes Parámetros Estructurales (PE): desplazamiento lateral en el tope del edificio y deriva máxima de pisos. HAZUS 99 presenta curvas de fragilidad para el primer caso. Se consideró que la Intensidad Sísmica (IS) está representada por los acelerogramas indicados en la Tabla 3.

Tabla 3: Datos relevantes de los sismos considerados en el estudio ($1 \text{ gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$).

Reg.	Estación	País	Fecha	Magnitud	Comp.	Distancia Epic. (km.)	Aceler. Máxima (gal.)
1	Armenia (Carme)	Colombia	25/01/99	6.20	E-W	13	518.4
2	Armenia (Carme)	Colombia	25/01/99	6.20	N-S	13	-580.1
3	Finlandia (C Flan)	Colombia	25/01/99	6.20	E-W	33	554.9
4	Finlandia (C Flan)	Colombia	25/01/99	6.20	N-S	33	-477.8
5	Pereira (C Per)	Colombia	25/01/99	6.20	E-W	48	-207.8
6	Pereira (C Per)	Colombia	25/01/99	6.20	N-S	48	141.5
7	Ricaurte (C Rica)	Colombia	17/07/98	3.07	E-W	637	132.4
8	Ricaurte (C Rica)	Colombia	17/07/98	3.07	N-S	637	-124.8
9	Pereira (C Mazpa)	Colombia	19/02/97	6.10	E-W	154	127.7

Las curvas de fragilidad son gráficas en las cuales en el eje de las X se especifica el PE, y en el eje de las Y la probabilidad de excedencia (P). Por lo tanto, como el problema se trabaja en forma probabilística se tiene que definir una función de distribución que mejor se ajuste a los datos. En este trabajo se emplea una función de distribución lognormal, que tiene la siguiente forma matemática:

$$P(ED \geq ED_i / IS) = \Phi \left[\frac{1}{\sigma_{PE}} \ln \left(\frac{PE}{\overline{PE}} \right) \right] \quad (1)$$

donde \overline{PE} es el valor medio del parámetro estructural, σ_{PE} es la desviación estándar del parámetro estructural seleccionado, IS es la intensidad sísmica, ED_i estado de daño en el punto discreto i . La ecuación (1) representa la probabilidad de que el estado de daño ED sea mayor o igual al estado de daño ED_i en el punto discreto i para un determinado nivel de intensidad sísmica IS .

Si el parámetro estructural PE que se considera es el desplazamiento lateral máximo en el tope del edificio D_t , la ecuación (1) se transforma en:

$$P = \Phi(z)$$

$$z = \frac{1}{\sigma_{D_t}} \ln \left(\frac{D_t}{\overline{D_t}} \right) \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx \quad (3)$$

siendo $\overline{D_t}$ el valor medio del desplazamiento lateral máximo del grupo de datos analizados y σ_{D_t} la desviación estándar de ese grupo de datos. Si el PE hubiera sido la deriva máxima de piso, se habría reemplazado γ en lugar de D_t en la ecuación (2).

ESTRUCTURAS Y SISMOS DE ANÁLISIS

Se estudiaron 119 estructuras de hormigón armado de 1 a 6 pisos, las que se encuentran descritas en Bobadilla (2005) y responden a la forma como se construye en el Ecuador. Las de un piso tienen columnas de 20/20 cm y las de seis pisos columnas de 45/45 cm. Las luces son de 4.0 m y la altura de entrepiso es de 3.0 m.

La tendencia en el Ecuador es no colocar vigas descolgadas, sino vigas perdidas en la losa o si tienen vigas descolgadas, que aparezca la menor dimensión posible. Es así como para un piso las vigas son de 20/20 cm y para 6 pisos las vigas son de 60/30 cm. En todos los casos la primera dimensión corresponde a la base de la sección transversal y la segunda a la altura.

El refuerzo longitudinal de columnas varió desde una cuantía del 1% al 2% y el de vigas de 0.5% al 1.5%. Los estribos colocados en vigas y columnas son de 8 mm, de diámetro espaciados a 10 cm, en los extremos del elemento y 20 cm, en el centro de luz. Son estribos simples en las columnas sin binchas adicionales ni estribo doble. El hormigón utilizado es de 210 kg/cm², y el acero tiene un límite de fluencia de 4200 kg/cm².

Setenta y dos edificios de 1 a 6 pisos fueron analizados ante los nueve registros sísmicos que se indican en la Tabla 3, lo que da un total de 648 casos. En la Figura 1 se indica una planta tipo y en la Figura 2 se muestra el edificio en elevación para 4 pisos. Adicionalmente se estudió el comportamiento de 44 estructuras pero no ante todos los eventos

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

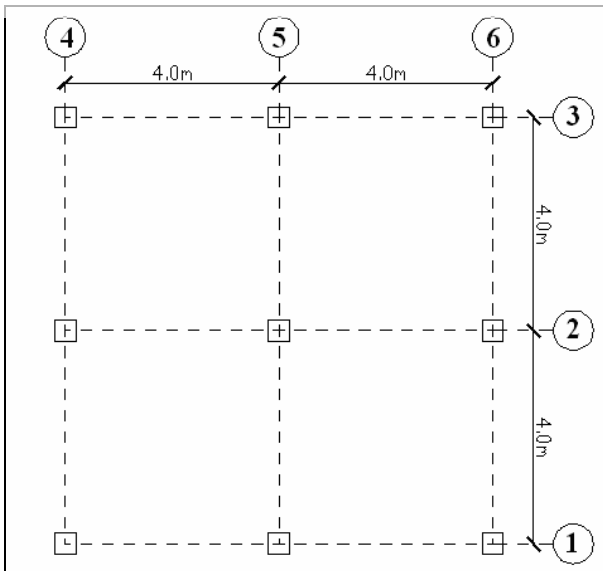


Figura 1: Planta tipo de edificios analizados.

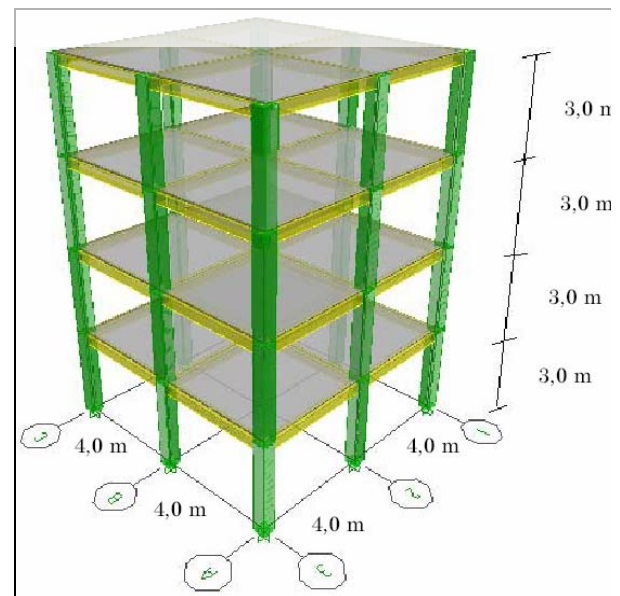


Figura 2: Estructura de análisis para cuatro pisos.

ANÁLISIS NO LINEAL Y CLASIFICACIÓN

Se empleó el programa IDARC (*Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Structures*, Park et al., 1987) para encontrar la respuesta no lineal en el tiempo de cada estructura ante cada uno de los sismos especificados en la Tabla 3. El programa considera el modelo de Kent y Park (1971) para el comportamiento del hormigón y el modelo trilineal para el comportamiento del acero que contempla incremento de resistencia en la zona de endurecimiento. Por otra parte se utilizó el modelo de histéresis de Park et al. (1987) que contempla deterioro de rigidez en la descarga, el deterioro de la resistencia y el efecto *pinching* o de cierre de grietas. Se realizó un análisis en 2 dimensiones.

Por otra parte, Ghobarah et al. (1997) definen cinco niveles de desempeño en función de la distorsión máxima de piso γ , los que se indican en la Tabla 4; esta clasificación es la que se utilizó en el estudio. En la Tabla 4 se indica además en forma general el nivel de daño en cada clasificación y el desempeño.

Tabla 4: Niveles de daño propuestos por Ghobarah et al. (1997).

Distorsión de Piso	Daño	Descripción del daño	Desempeño
$\gamma < 0.002$	Sin daño	Sin daño	Sin daño
$0.002 \leq \gamma < 0.005$	Leve	Grietas ligeramente visible.	Agrietamiento
$0.005 \leq \gamma < 0.011$	Moderado	Grietas menores de 1 mm.	Fluencia del acero
$0.011 \leq \gamma < 0.023$	Extenso	Grietas entre 1 y 2 mm.	Inicio de mecanismo
$\gamma \geq 0.023$	Completo	Grietas mayores a 2 mm.	Mecanismo global.

Una vez que se obtuvo la respuesta en el tiempo, se clasificaron los casos de acuerdo a la deriva máxima de piso. Se clasificó teniendo en cuenta los valores indicados en la primera columna de la Tabla 4; esta clasificación se indica en la Tabla 5.

Se destaca que hay 154 casos en que la deriva máxima de piso es mayor que 0.023 y que han sido clasificadas como daño completo pero esto no significa que las estructuras van a colapsar. Se espera que se presenten grietas mayores de 2 mm, pero no necesariamente los edificios colapsan.

Tabla 5: Clasificación de los casos estudiados por niveles de daño.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Pisos	Sin Daño	Daño Leve	Daño Moderado	Daño Extenso	Daño Completo
1	---	20	27	20	41
2	---	20	45	20	32
3	---	32	41	21	21
4	---	46	37	20	20
5	11	44	21	21	20
6	12	21	20	39	20
TOTAL	23	183	191	141	154

CURVAS DE FRAGILIDAD DE DESPLAZAMIENTOS

Para cada grupo de datos indicados en la Tabla 5 se encontró el valor medio de los desplazamientos obtenidos D_i y la correspondiente desviación estándar σ_{D_i} , las que se indican en la Tabla 6 y que sirvieron de base para la obtención de las curvas de fragilidad de desplazamientos. Para no extender la exposición, en la Figura 3 se indica esta curva para estructuras de 3 pisos y en la Figura 4 para estructuras de 6 pisos.

Tabla 6: Valores medios y desviación estándar de los desplazamientos por piso.

PISO	LEVE		MODERADO		EXTENSO		COMPLETO	
	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
1	1.1740	0.1640	2.6882	0.5155	3.9641	0.9895	12.5502	1.3842
2	2.1954	0.5979	3.8331	0.7096	10.4608	1.2490	20.5316	1.7036
3	2.5793	0.4984	5.3882	1.3696	9.5647	1.8479	18.1957	1.7394
4	3.1805	0.6448	6.9864	1.1527	11.9424	1.7463	23.3404	0.6785
5	4.0867	0.7726	7.4300	0.8102	15.2093	1.2297	23.1213	0.8645
6	4.1561	1.0938	10.0666	1.2437	16.8875	1.4928	26.2543	1.4690

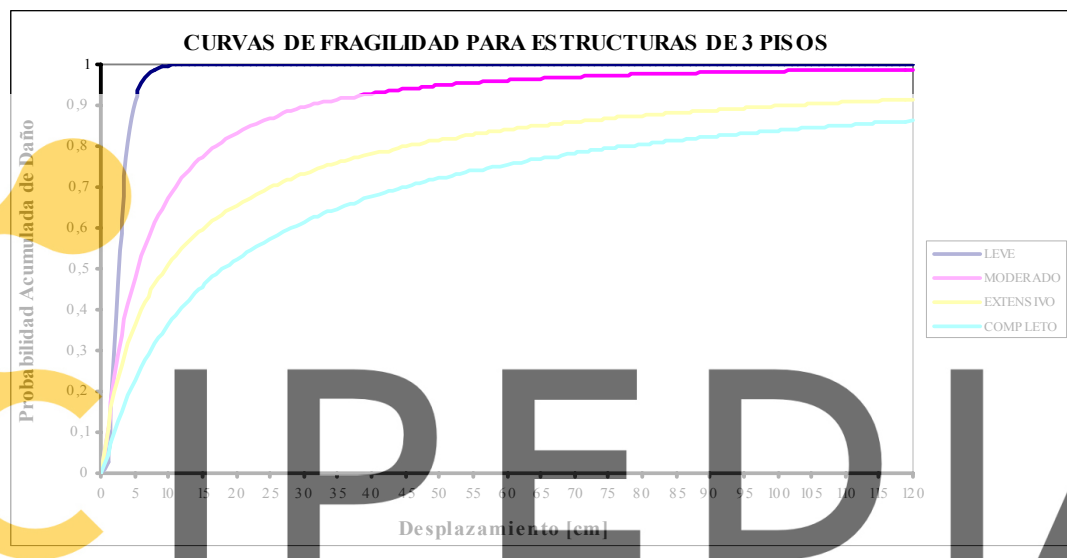


Figura 3: Curva de fragilidad de desplazamientos para estructuras de 3 pisos.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

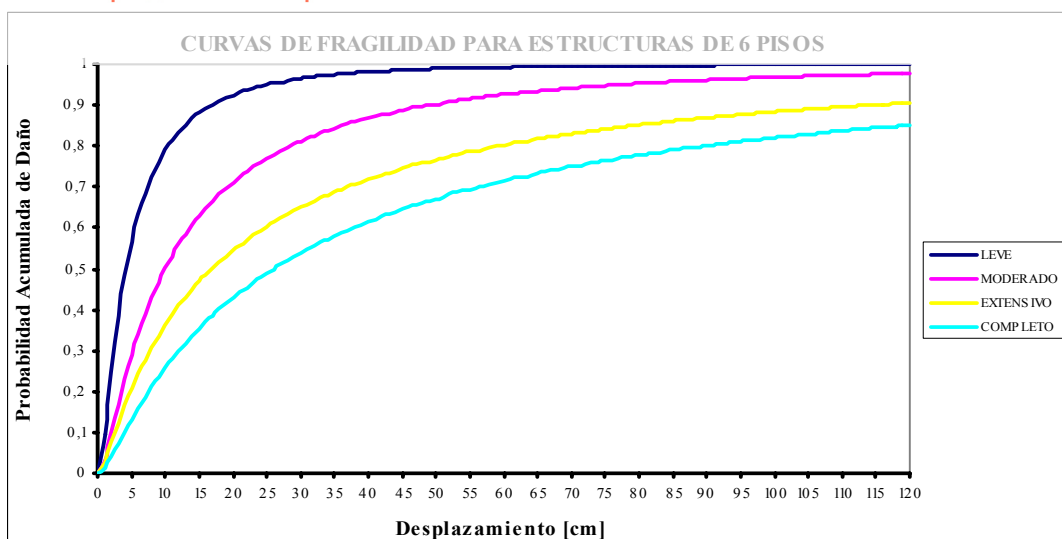


Figura 4: Curva de fragilidad de desplazamientos para estructuras de 6 pisos.

Con el propósito de comparar las curvas de fragilidad obtenidas con las que reporta el programa HAZUS 99, los datos obtenidos del estudio se agruparon en dos: el primero contiene los resultados de las estructuras de 1 a 3 pisos y el segundo grupo tiene los resultados para edificios de 4 a 6 pisos. En la Tabla 7 se indican los valores medios y la

desviación estándar para estos dos grupos. Las curvas que se obtienen para estos dos grupos se indican en las Figuras 5 y 6, para estructuras de 1 a 3 pisos y de 4 a 6 pisos, respectivamente.

Tabla 7: Valores medios y desviación estándar de los desplazamientos. Por grupos.

PISO	LEVE		MODERADO		EXTENSO		COMPLETO	
	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
1-3	1.631	0.371	3.970	0.865	7.997	1.362	17.093	1.609
4-6	3.808	0.837	8.161	1.069	14.680	1.490	24.239	1.004

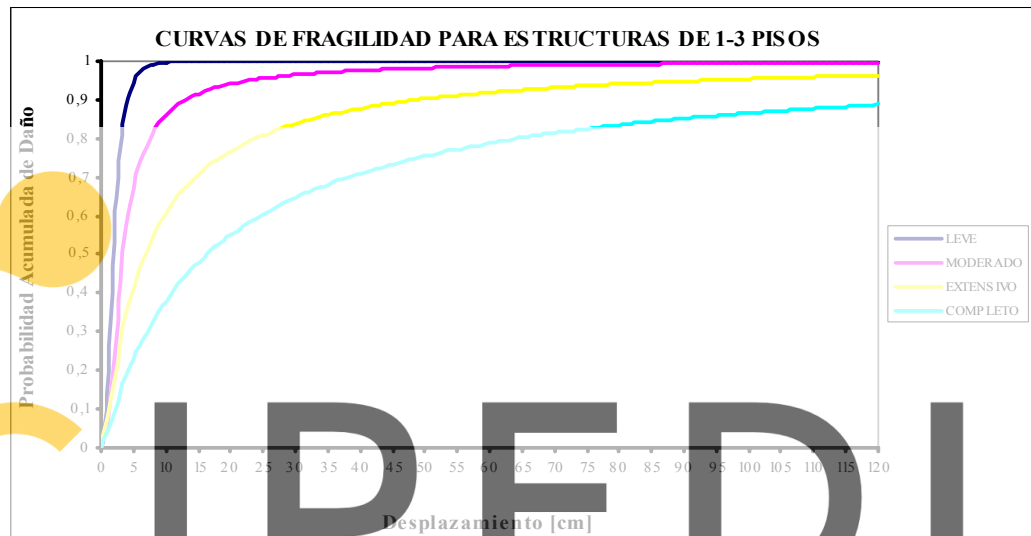


Figura 5: Curvas de fragilidad de desplazamiento para estructuras de 1 a 3 pisos.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

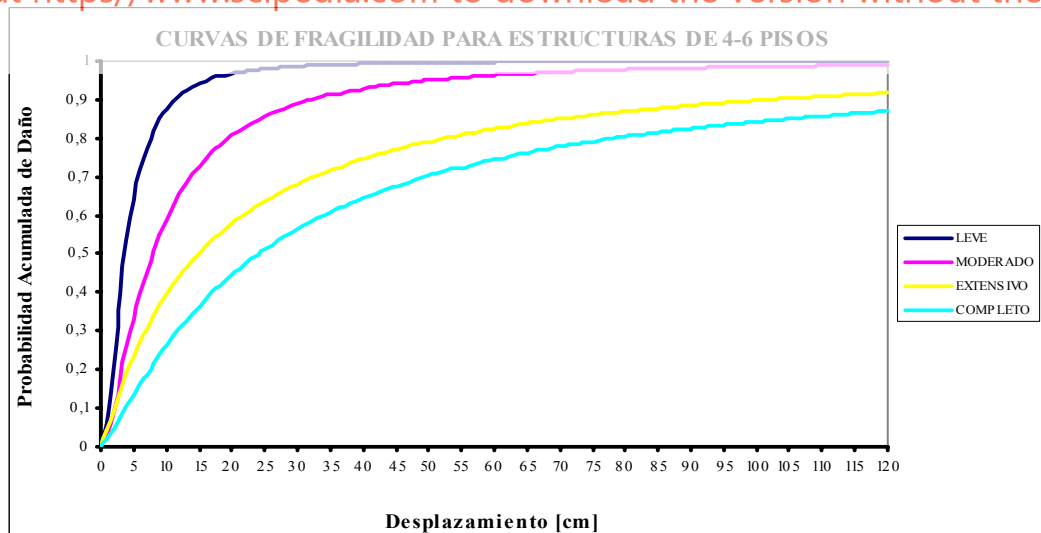


Figura 6: Curvas de fragilidad de desplazamiento para estructuras de 4 a 6 pisos.

HAZUS 99 presenta cuatro curvas de fragilidad similares a las de la Figura 5 y otras cuatro similares a las de la Figura 6, que corresponden a los niveles de diseño denominados: pre código, bajo, moderado y alto. El nivel de diseño denominado pre código sirve para estructuras que *no* se hallan en zonas sísmicas, el nivel de diseño llamado bajo para

estructuras que se hallan en zonas de *muy baja* sismicidad, el nivel de diseño moderado para aquellas que se encuentran en zonas de *moderada* intensidad y el nivel de diseño denominado alto para estructuras que se hallan en zonas de *alta* peligrosidad sísmica.

Las curvas de fragilidad obtenidas y mostradas en las Figuras 5 y 6 se compararon con las de HAZUS 99 para los cuatro niveles de diseño y se encontró que las que mejor se aproximan son las correspondientes al nivel de diseño sísmico denominado bajo. En la Figuras 7 y 8 se presentan las curvas de fragilidad de HAZUS 99 para las estructuras C1L y C1M, respectivamente, para el nivel de diseño bajo.

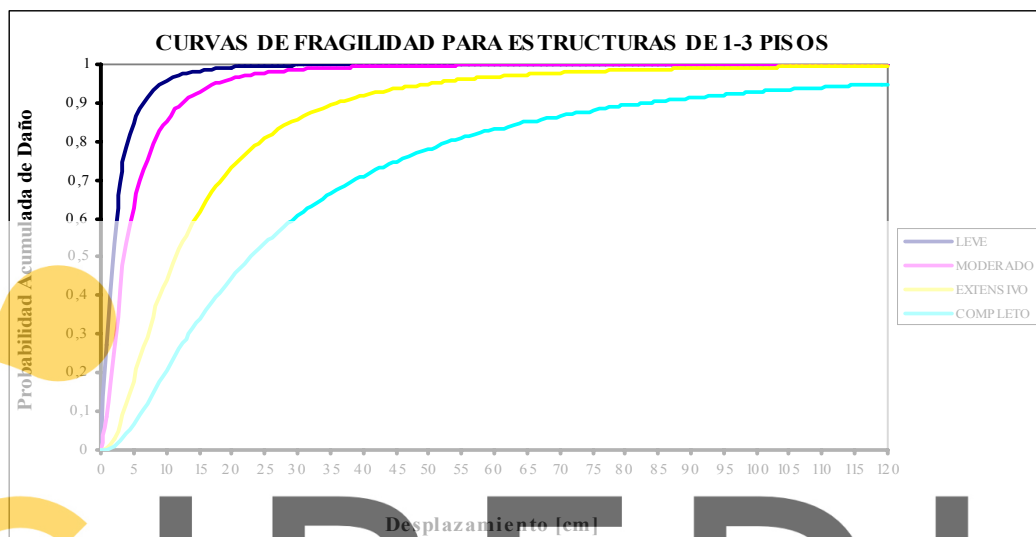


Figura 7: Curvas de fragilidad de desplazamientos para estructuras C1L.

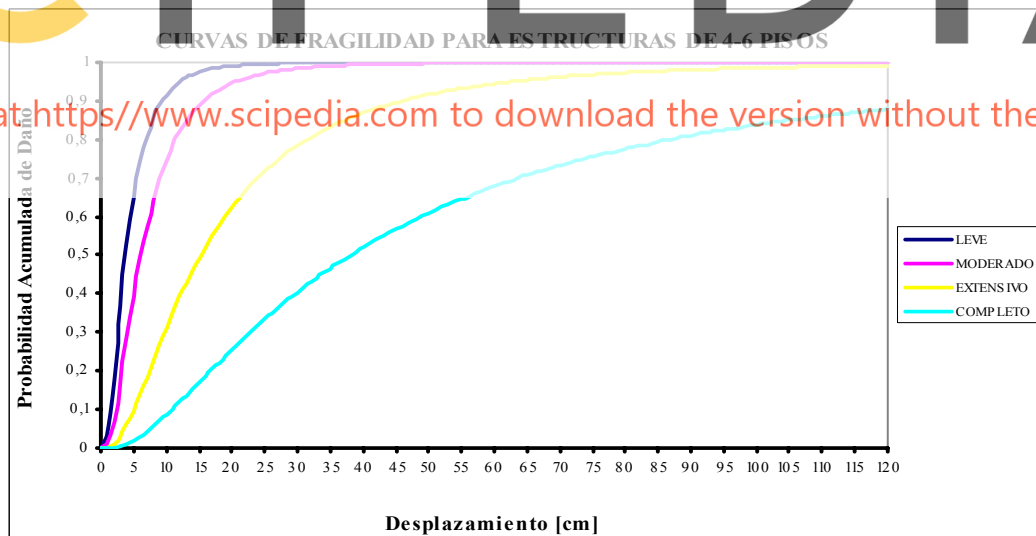


Figura 8: Curvas de fragilidad de desplazamientos para estructuras C1M.

En la Figura 9 se presentan las curvas de fragilidad encontradas en el estudio y las de HAZUS 99 para el caso de 1 a 3 pisos. Se aprecia que para los niveles de daño leve y moderado las curvas de fragilidad encontradas en este estudio son prácticamente las mismas que las de HAZUS pero para los niveles de daño extenso y completo existe cierta diferencia. De acuerdo a la Figura 9, el nivel de daño que se espera con las curvas de fragilidad obtenidas en el presente estudio es mayor que las reportada por HAZUS para desplazamientos laterales máximos que están en el orden de 20 cm, y 30 cm, para daño extenso y completo. Para desplazamientos mayores las curvas se aproximan bastante.

Para estructuras de 1 a 3 pisos, el desplazamiento lateral máximo por lo general será menor a 30 cm por lo que se puede indicar que las curvas de fragilidad de HAZUS 99 reportan menor porcentaje de daño acumulado para los niveles denominados extensivo y completo.

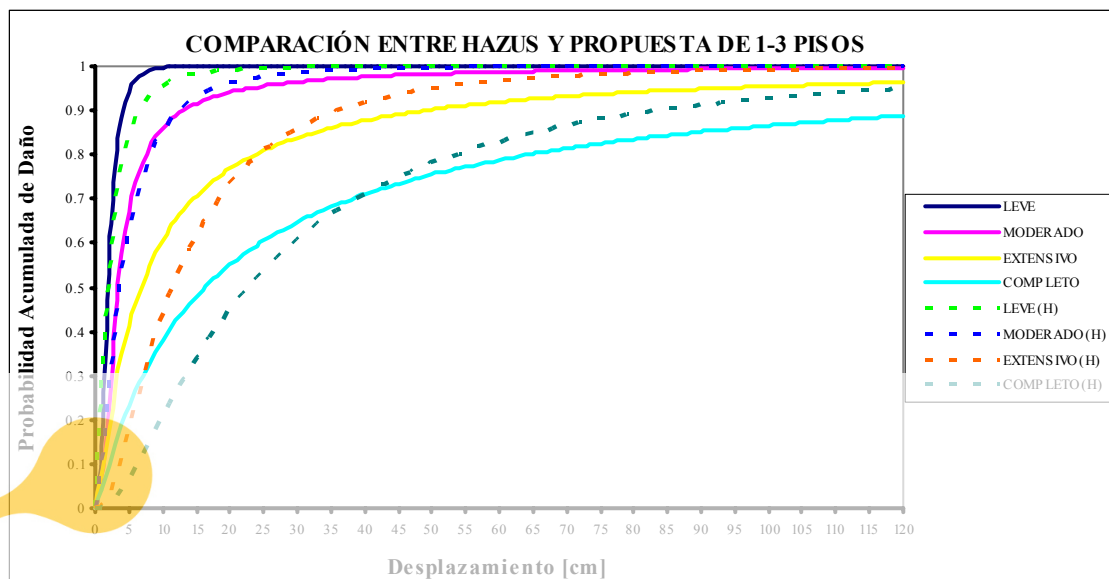


Figura 9: Comparación de curvas de fragilidad con las de HAZUS para estructuras de 1 a 3 pisos.

En la Figura 10 se comparan las cuatro curvas de fragilidad obtenidas en el estudio para estructuras de 4 a 6 pisos con las reportadas por HAZUS 99 para el nivel de diseño sísmico bajo. La aproximación es muy buena para el daño leve y existe diferencia para los restantes niveles de daño. Se aprecia que HAZUS reporta mayor daño acumulado para los niveles moderado y extensivo. Se destaca que HAZUS trabajó en este grupo denominado C1M con estructuras de 4 a 7 pisos y en el estudio se trabajó con estructuras de 4 a 6 pisos.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

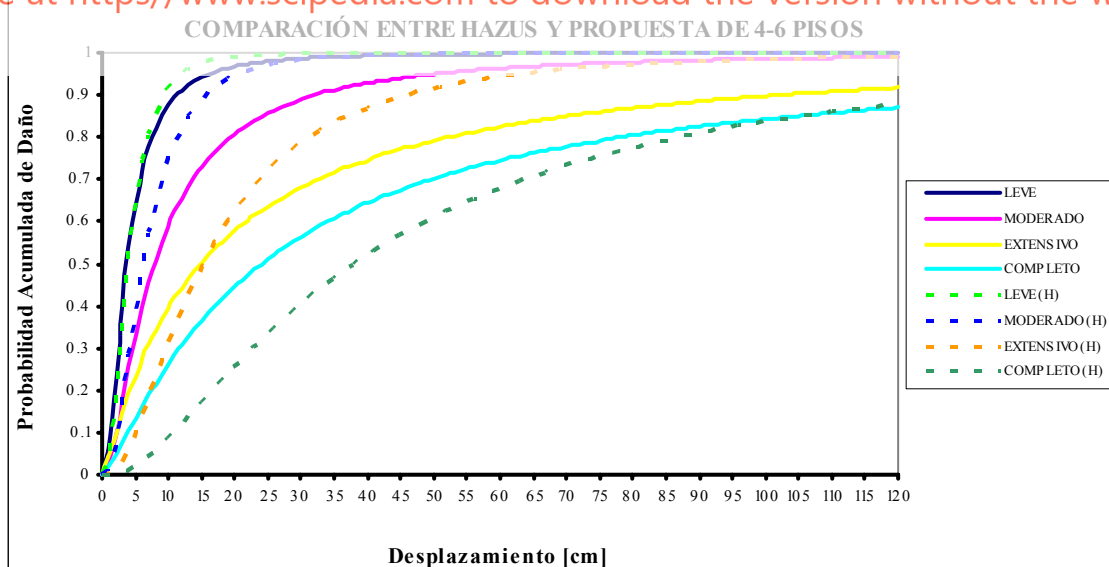


Figura 10: Comparación de curvas de fragilidad con las de HAZUS para estructuras de 4 a 6 pisos.

CURVAS DE FRAGILIDAD DE DERIVA MÁXIMA DE PISO

En Aguiar y Bobadilla (2005) se presentan las curvas de fragilidad de deriva de piso máxima para cada piso. Estas curvas se obtuvieron a partir de los datos indicados en la Tabla 8 que se encontraron en el estudio.

Tabla 8: Valores medios y desviación estándar de las derivas de piso en porcentaje. Por piso.

PISO	LEVE		MODERADO		EXTENSO		COMPLETO	
	VALOR MEDIO	DESVIAC ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIAC ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIAC ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIAC ESTÁNDAR
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	0.397	0.050	0.896	0.175	1.303	0.327	3.675	0.818
2	0.378	0.093	0.674	0.120	1.674	0.388	3.708	0.912
3	0.346	0.066	0.750	0.188	1.530	0.317	3.213	0.567
4	0.343	0.071	0.776	0.146	1.698	0.399	2.822	0.434
5	0.361	0.066	0.778	0.154	1.620	0.388	2.901	0.737
6	0.358	0.057	0.854	0.187	1.643	0.352	2.957	0.740

De igual manera se agruparon los resultados en dos grupos, de uno a tres pisos y de cuatro a seis pisos. Los valores medios y la desviación estándar para estos grupos se presentan en la Tabla 9 y las correspondientes curvas de fragilidad en las Figuras 11 y 12.

Tabla 9: Valores medios y desviación estándar de las derivas de piso en porcentaje. Por grupos.

PISO	LEVE		MODERADO		EXTENSO		COMPLETO	
	VALOR MEDIO	DESVIAC ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIAC ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIAC ESTÁNDAR	VALOR MEDIO	DESVIAC ESTÁNDAR
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1-3	0.374	0.070	0.773	0.161	1.503	0.344	3.532	0.766
4-6	0.354	0.064	0.803	0.162	1.654	0.380	2.893	0.637

El Código Ecuatoriano de la Construcción, CEC-2000, establece como deriva máxima de piso el 2%, cantidad alta ya que el daño típico de un terremoto sísmico de estructura flexible no viene acompañado de un daño mayor al 80% de daño extenso y un 20% de daño completo.

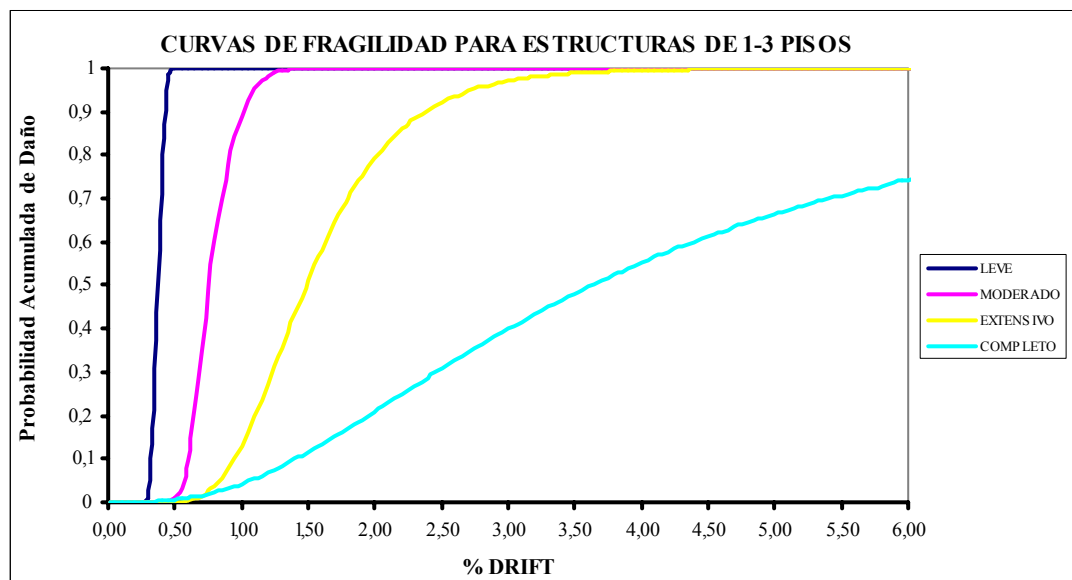


Figura 11: Curvas de fragilidad de deriva máxima de piso (“drift”) para estructuras de 1 a 3 pisos.

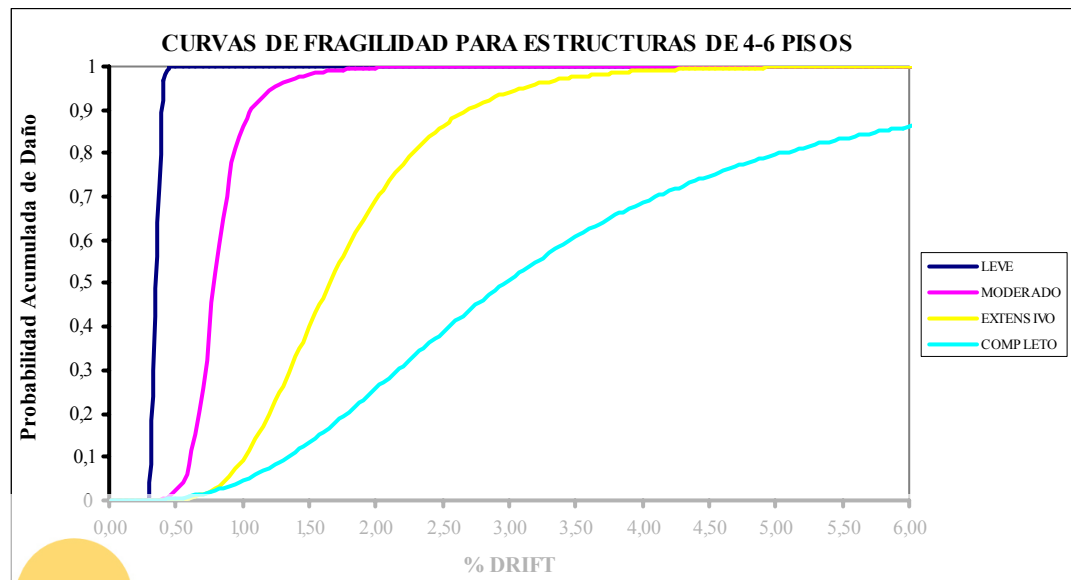


Figura 12: Curvas de fragilidad de deriva máxima de piso (“drift”) para estructuras de 4 a 6 pisos.

CONCLUSIONES

Se han analizado 72 estructuras ante la acción de 9 sismos y también de 44 estructuras más, con lo que se tiene un gran total de 692 casos, en base a los cuales se han determinado curvas de fragilidad de desplazamiento lateral máximo y de distorsión máxima de piso en edificios de hormigón armado de 1 a 6 pisos. Estas curvas están clasificadas para cuatro niveles de daño denominados: leve, moderado, extensivo y completo. Del estudio realizado se desprende la siguiente conclusión.

Las curvas de fragilidad obtenidas en el estudio se aproximan bastante bien con las curvas de fragilidad de HAZUS 99 para el nivel de diseño sísmico bajo, debido a que las vigas tienen muy poco peralte y el refuerzo transversal que se utiliza es simple de 8 mm. Esto debe ser un llamado de atención, ya que el nivel de diseño sísmico *bajo* se lo utiliza en zonas de *baja* sismicidad y el Ecuador es un país con un *alto* peligro sísmico.

REFERENCIAS

- Aguilar, R., y Bobadilla, C. (2005). “Curvas de fragilidad para estructuras de H/A de Ecuador menores a siete pisos”, *Revista Ciencia, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército*, Vol. 8, No. 2, pp. 81-88, Quito, Ecuador.
- Aguilar, R. (2002). *Sistema de Computación CEINCI3 para evaluar daño sísmico en los Países Bolivarianos*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador.
- Bobadilla, C. (2005). *Curvas de Fragilidad y Evaluación Rápida de la Vulnerabilidad Sísmica de Estructuras*, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador.
- Ghobarah, A., Aly, N. y El-Attar, M. (1997). “Performance level criteria and evaluation. A critical review of proposed guidelines”, en: *Seismic design methodology for the next generation of codes*, Fajfar and Krawinkler, Editors, Balkema, Slovenia.
- HAZUS 99 (1999). *Earthquake Loss Estimation Methodology*, Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences NIBS, Vol. 5, Chap. 5, Washington D.C.
- Kent, D., y Park, R. (1971), “Flexural members with confined concrete”, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 97, No. ST7, pp. 1969-1990.
- Park, Y., Reinhorn, A., y Kunnath, S. (1987). *IDARC: Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Frame-Shear-Wall Structures*, Technical Report NCEER-87-0008, State University of New York at Buffalo, Buffalo, New York.